# Über den Niedervoltbogen.

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde

der Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Johann Wolfgang Goethe-Universität

zu Frankfurt am Main

vorgelegt von

GEORG VÖLLKOPF

aus

Frankfurt am Main

1939

Ludwig Baum, Frankfurt am Main, Reineckstraße 17 – 19

Referenten:

Prof. Dr. M. Czerny

Prof. Dr. E. Madelung

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 1938

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

## 1. Einleitung.

Außer den grundlegenden Arbeiten (1,2) *) über den Niedervoltbogen (NV) gingen in neuerer Zeit die Untersuchungen von Druyvesteyn (3) und Kniepkamp (4) auf die Kennlinie dieser Entladungsform ein. Sie untersuchten den Verlauf der Kennlinie in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie Gasdruck, Kathodentemperatur, Elektrodenabstand und fanden übereinstimmend, daß bei Annäherung an den Sättigungsstrom der Glühkathode die Brennspannung des NV mit steigendem Strom rasch ansteigt, bis die Ionisierungsspannung des Füllgases erreicht ist und der NV beim Überschreiten des Sättigungsstroms in den normalen Bogen übergeht. Im Gegensatz dazu wurde bei einer früher hier durchgeführten Arbeit (5) gefunden, daß zuweilen beim Erreichen einer bestimmten Stromstärke der NV umschlägt, die Entladung geht unstetig in eine andere Form über. Der Strom sinkt dabei ab auf einen sehr kleinen Wert von einigen Milliampère, während infolgedessen die Spannung stark ansteigt. Der Strom entspricht etwa dem raumladungsbegrenzten Elektronenstrom, wie ihn dieselbe Anordnung im Hochvakuum ergeben würde, die Ionisation und damit das Leuchten der Entladung sind sehr gering. Es schien danach in Abhängigkeit von noch nicht näher bekannten Bedingungen möglich zu sein, daß der NV sich beim Erreichen des Sättigungsstroms in verschiedener Weise weiterentwickelt. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war, die Bedingungen zu ermitteln, die den Übergang des NV in die eine oder andere Entladungsform bewirken, und außerdem die Weiterentwicklung des NV durch Sondenmessungen nach der von Langmuir angegebenen Methode näher zu untersuchen.

## 2. Experimentelles.

Versuche mit einem kugelförmigen Entladungsrohr von 10 cm Durchmesser zeigten, daß bei größerem Elektrodenabstand starke Störungen der Entladung auftraten, die durch zu große Annäherung

*) Vgl. Literaturverzeichnis am Ende der Arbeit.

der Elektroden an die Rohrwände verursacht waren. Unter sonst gleichen Bedingungen stieg bei Vergrößerung des Elektrodenabstandes die Brennspannung stark an, schließlich war, wenn der Wandabstand der Elektroden, besonders der Kathode, einen bestimmten Wert unterschritt, kein anomaler NV mehr möglich. Da die Versuche zugleich ergaben, daß für die Reproduzierbarkeit des Umschlags der Entladung ein großer Elektrodenabstand erforderlich war, wurde für die Messungen als Entladungsrohr eine Kugel von 18 cm Durchmesser benutzt. Sie war mit beweglicher Anode, beweglicher Sonde und auswechselbarer Kathode versehen. Damit konnten Entladungen mit Stromstärken bis zu 5 A bei Heizströmen bis zu 30 A dauernd betrieben werden. Die Bewegung der Anode, einer Eisenscheibe von 47 mm Durchmesser, und der Sonde wurde durch Drehen der Metallschliffe $M_1$ und $M_2$ mittels Zahnstangen und Trieb bewirkt. Der Elektrodenabstand war von 0 bis 11 cm veränderlich. Die Bewegung der Sonde erfolgte im allgemeinen in der Rohrachse, sie konnte jedoch auch durch Drehen des Schliffes $S_2$ seitlich durch die Entladung bewegt werden, sodaß der ganze Raum zwischen den Elektroden abgetastet werden konnte. Die Sonde bestand aus Wolframdraht von etwa 0,01 mm Durchmesser und einer Länge von etwa 2 mm. Der Sondenträger war eine Quarzkapillare von 2 mm Außendurchmesser, die an ihrem vorderen Ende so ausgezogen war, daß der Sondendraht gerade hindurchging.

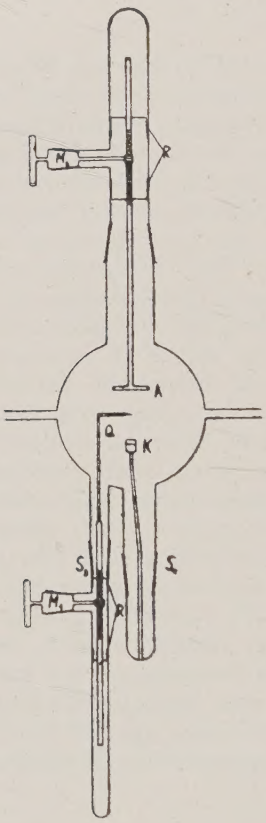


Fig. 1: Entladungsrohr

$M_1$ u. $M_2$: Metallschliffe
$S_1$ u. $S_2$: Schliffe
R : Führungsringe
A: Anode
K: Kathode
Q: Sonde

Als Kathode wurde zu den Messungen eine Platinfolie von 0,03 × 10 × 30 mm verwandt, die auf ihrer der Anode zugewandten Seite mit Oxyd bestrichen war. Diese Anordnung hatte den Vorteil, daß sie räumlich einfache Verhältnisse in der Entladung ergab, außerdem war damit der Umschlag der Entladung am besten reproduzierbar zu erhalten. Als Oxydbelag erwies sich am günstigsten eine Mischung von in stark verdünntem Zaponlack aufgeschlämmtem BaO und SrO, mit der sich, was für die Reproduzierbarkeit des Umschlags der Entladung wesentlich war, sehr dünne, gleichmäßige und gut haftende Schichten herstellen ließen, die leicht zu formieren waren und eine große Lebensdauer aufwiesen, wenn die Entladung mit niedriger Spannung brannte.

Wie die Vorversuche zeigten, bewirkten bereits kleine Verunreinigungen des Füllgases stets eine beträchtliche Erhöhung der Brennspannung. Da aber eine Schwankung der Anodenspannung u. U. eine bis zu 10 mal so große Schwankung des Sondenstroms nach sich zog, war es zur Erzielung reproduzierbarer Sondenmessungen notwendig, konstante und über längere Zeit stabile Brennbedingungen zu haben, die nur bei größtmöglicher und vor allem gleichbleibender Gasreinheit zu erwarten waren. Nach ausgedehnten Versuchen wurden schließlich alle Untersuchungen im zirkulierenden Gas vorgenommen, wobei eine ständige Reinigung des Gases stattfand, die durch Zerstäubung von Magnesium bewirkt wurde. Mit dieser Anordnung konnten die Brennbedingungen während einer Meßreihe, die etwa 6 Stunden in Anspruch nahm, hinreichend konstant gehalten werden, sodaß Spannungschwankungen infolge schwankender Gasreinheit hierdurch vermieden wurden. Meßreihen mehrerer Tage schlossen bei diesem Verfahren gut aneinander an.

Die Schaltung war die für Sondenmessungen übliche. Zur Erzielung reproduzierbarer Sondenmessungen war es aus dem oben angegebenen Grunde außerdem erforderlich, die durch die Stromquelle verursachten Schwankungen der Anodenspannung in der Größe einiger Promille zu halten. Die Schwankungen der Heizspannung mußten ebenfalls so klein gehalten werden, daß ihre Rückwirkung auf die Anodenspannung unter dieser Grenze blieb. Letzteres war auch deshalb erforderlich, weil eine Schwankung des Heizstroms stets Anlaß gab zu länger dauerndem, unruhigem Brennen der ganzen Entladung, wodurch alle Messungen außerordentlich zeitraubend wurden. Nach zahlreichen Versuchen erwies es sich als einzig gangbarer Weg, die Messungen nachts mit Batterien großer Kapazität vorzunehmen, die dann nur für diesen Zweck zur Verfügung standen. Außerdem wurden sowohl Heiz- wie Anodenspannung mit einer Kompensations-

methode dauernd überwacht und der Spannungsrückgang der Heizbatterie infolge des großen Verbrauchs ständig auf weniger als 0,1 % ausgeglichen. So war es möglich, Sondenmessungen bis auf einige Prozent reproduzierbar zu erhalten.

### 3. Gang der Messungen.

Die Messungen wurden in Argon bei einem Druck von 1 mm Hg durchgeführt, der Elektrodenabstand war 6 cm. Der Bogenstrom betrug 0,2 A bei Heizströmen zwischen 15 und 20 A. Dabei betrug der Spannungsabfall auf der Kathode maximal 1,5 V. Die Anodenspannung wurde gegen das negative Ende der Kathode gemessen, während die Sondenspannung gegen Anode gemessen und dann auf das negative Kathodenende umgerechnet wurde. Die Stromstärke von 0,2 A für den Bogenstrom wurde deshalb gewählt, weil dabei in allen untersuchten Entladungen die Sondenströme so klein blieben, daß die Sonde nicht auf die zur Elektronenemission erforderliche Temperatur kam, sodaß hierdurch bedingte Störungen sicher vermieden wurden. Die Messungen wurden stets erst dann begonnen, wenn keine durch unruhiges Brennen der Entladung bedingten Schwankungen mehr vorhanden waren. Schwingungen der Entladung traten nur während des Ausheizens auf, solange das Edelgas infolge starker Gasabgabe des Rohres nicht sauber blieb, sie verschwanden bei hinreichender Gasreinheit.

Um in verschiedenen Arbeitspunkten der Kennlinie den NV durch Sondenmessungen zu untersuchen, mußte das Verhältnis von Kathodenemission zu Bogenstrom geändert werden. Dazu kann entweder bei festem Heizstrom der Bogenstrom geändert werden, oder es wird umgekehrt der Heizstrom und damit die Emission bei konstantem Bogenstrom variiert. Es wurde zunächst versucht, durch passende Änderung des Anodenstroms in die gewünschten Teile der Kennlinie zu gelangen. Dabei zeigte sich, daß der kleinste Bogenstrom, bei dem ohne wesentliche Störung der Entladung Sondenmessungen durchgeführt werden konnten, etwa 0,1 A betrug, da bei schwächeren Strömen besonders die kathodennahen Entladungsteile häufig der Sonde auswichen. Infolge des flachen Verlaufs der Kennlinie des NV wären zum Erreichen anderer Arbeitspunkte sehr große Anodenströme, bis zu einigen Ampère, erforderlich gewesen. Wie Versuche ergaben, traten dabei auch sehr große Sondenströme auf, denen die benutzte Anordnung nicht gewachsen war. Außerdem ist bei großen Bogenströmen auch bei festgehaltenem Heizstrom die Emission der Kathode,

auf die es ja ankommt, nicht konstant, da der Bogenstrom zur Aufheizung der Kathode beiträgt. Es besteht zwar die Möglichkeit, diesen Einfluß auszugleichen, indem man die Kathode als Widerstandsthermometer benutzt und bei Vergrößerung des Bogenstroms den Heizstrom entsprechend verkleinert, sodaß der Widerstand und damit die Temperatur gleichbleibt. Versuche in dieser Richtung ergaben jedoch, daß sich dabei die Entladung sehr leicht auf einige wenige Stellen der Kathode zusammenzieht, die dann durch den Bogenstrom sehr stark aufgeheizt werden und in völlig unkontrollierbarer Weise zur Emission beitragen, da die Widerstandsmessung nur einen Mittelwert der Temperatur der ganzen Kathode ergibt.

Es wurde daher das zweite Verfahren gewählt, das die Möglichkeit bot, mit verhältnismäßig kleinen Heizstromänderungen große Änderungen der Emission zu bewirken. Auch bleiben bei diesem Verfahren die Stromdichte und daher auch die Gasdichte in der Entladung konstant, sodaß durch Variation des Heizstroms tatsächlich nur das Verhältnis von Kathodenemission zu Bogenstrom geändert wird, während alle übrigen Bedingungen weitgehend erhalten bleiben.

In den Gebieten der Entladung, in denen sich das Raumpotential mit dem Abstand von der Kathode stark ändert, wurden Sondenmessungen von 5 zu 5 mm vorgenommen, in den anderen Teilen der Entladung, wo die Änderung kleiner ist, von 10 zu 10 mm. Es stellte sich heraus, daß eine Sondencharakteristik, die von hohen positiven Spannungen herkommend aufgenommen wurde, in dem Gebiet kleiner Sondenspannung anders verlief als eine in umgekehrter Richtung gemessene, während die Werte bei hohen positiven und negativen Sondenspannungen stets übereinstimmten. Wenn jedoch zwischen zwei Meßpunkten genügend gewartet wurde, meist waren einige Minuten erforderlich, dann ergaben sich aufwärts und abwärts gemessen dieselben Werte. Da dieses Verfahren die Messungen außerordentlich in die Länge gezogen hätte, wurden die Charakteristiken in beiden Richtungen aufgenommen, wobei die endgültige, nur äußerst langsam erfolgende Einstellung nicht abgewartet wurde, und vor der Auswertung wurden die Mittelwerte gebildet. Diese Methode lieferte, wie durch Versuche geprüft wurde, dieselben Ergebnisse in kürzerer Zeit.

### 4. Untersuchungsergebnisse.

Ausgedehnte Untersuchungen unter größtmöglicher Variation aller äußeren Bedingungen und unter Verwendung der verschiedensten Kathodenformen ergaben, daß bei hinreichend großem Elektro-

denabstand, etwa von 5 cm an, der Übergang des NV in eine andere Entladungsform wesentlich durch die Beschaffenheit der Kathode bedingt ist, während der Einfluß aller übrigen Bedingungen sich nur auf die Existenz des NV an sich erstreckt.

Wird eine sehr glatte und hinsichtlich Temperatur und Emission vollkommen gleichmäßige Kathode großer Oberfläche verwandt, dann schlägt der NV beim Erreichen einer kritischen Stromstärke um, die Ionisation geht fast vollständig zurück, es fließt nur noch ein sehr schwacher Strom. Eine Kathode, die diesen Anforderungen entsprach, war am besten durch Verwendung einer hinreichend dicken, mit Oxyd bedeckten Platinfolie von ausreichender Größe zu realisieren. Dabei mußte das Oxyd in möglichst dünner und gleichmäßiger Schicht aufgebracht werden, und es war erforderlich, die Kathode sehr sorgfältig zu formieren und einige Zeit hoch zu belasten, damit das Oxyd bis auf eine äußerst dünne und glatte Schicht verbraucht war. Unter diesen Voraussetzungen war es möglich, den Umschlag des NV reproduzierbar zu erhalten, sofern der Elektrodenabstand die erforderliche Größe aufwies. Bei zu kleinen Elektrodenabständen war der Umschlag nur sehr schwer oder garnicht herbeizuführen. Wurde dagegen als Kathode z. B. eine Wendel oder auch eine Platinfolie mit dicker und infolgedessen rauher und ungleichmäßiger Oxydschicht verwandt, dann ging beim Aufnehmen der Kennlinie der NV stets in den normalen Bogen über. Dabei zog sich die Entladung häufig auf einige bevorzugt emittierende Stellen der Kathode brennfleckartig zusammen. Zuweilen gelang es, auch eine anfangs dicke Oxydschicht durch langdauernde, starke Belastung in den für den Umschlag des NV günstigen Zustand zu bringen.

Ein Versuch, der mit einer besonderen Kathodenform durchgeführt wurde, scheint den entscheidenden Einfluß der Kathode zu bestätigen. Es wurde als Kathode eine längere Platinfolie benutzt, die bis an die Enden mit Oxyd bedeckt war und auf der ganzen Länge bei hohem Heizstrom formiert wurde. Hierauf wurde sie bei kleinem Heizstrom einige Zeit belastet, bis der Umschlag des NV eintrat. Es war nun der mittlere Bereich der Folie, der bei niedrigem Heizstrom allein zur Emission beiträgt, ausreichend glatt und gleichmäßig geworden. Wurde jetzt bei hohem Heizstrom ein NV neu gezündet, bei dem auch die weiter außen liegenden Teile der Kathode zur Emission beitrugen, dann erfolgte der Umschlag nicht bei einem etwas höheren Bogenstrom, wie man eigentlich erwarten sollte, sondern der NV ging in den normalen Bogen über, wobei sich die Entladung auf die außen liegenden Teile der Kathode zusammenzog. Erst wenn auch bei diesem höheren Heizstrom der Bogen längere Zeit gebrannt hatte, war der Umschlag zu erhalten.

Um Aufschluß darüber zu gewinnen, in welcher Weise die Beschaffenheit der Kathode den Entladungsmechanismus beeinflußt, wurden durch Aufnahme von Sondencharakteristiken einige NV in verschiedenen Arbeitspunkten der Kennlinie näher untersucht. Die Auswertung der Sondenmessungen erfolgte nach der Formel

$$i = N \cdot f \cdot \varepsilon \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon U}{kT}}$$

worin bedeuten: i Elektronenstrom zu einer Sonde mit negativem Potential, N Elektronenkonzentration, f Oberfläche der Sonde, ε und m Ladung Masse des Elektrons, T Elektronentemperatur und U die Spannung der Sonde gegen das Plasma. Der Elektronenstrom wurde ermittelt, indem von dem gemessenen Gesamtsrom der für niedrige Spannungen linear extrapolierte Ionenstrom abgezogen wurde. Zur Bestimmung der übrigen Größen wurde log i über U aufgetragen. Aus der Neigung dieser Kurven ergibt sich, soweit sie linear sind, T und aus ihrem oberen Knick folgt das Raumpotential. Durch Einsetzen dieser Größen in die obige Formel läßt sich auch N berechnen.

Die Messungen zeigten zunächst, daß sich aus den in Kathodennähe gewonnenen Sondencharakteristiken halblogarithmische Kurven ergaben, deren Anstieg nicht linear verlief. Um diese Verhältnisse genauer zu untersuchen, wurde ein NV mit 1 A Bogenstrom bei 8 cm Elektrodenabstand durchgemessen. Infolge des größeren Elektrodenabstandes konnte, um mit der Brennspannung wieder in das Minimum zu kommen, der Gasdruck verkleinert werden, sodaß die drei Teile der Entladung, Kathodendunkelraum, negatives Glimmlicht und Faradayscher Dunkelraum deutlich entwickelt und räumlich getrennt waren. Kathodendunkelraum und negatives Glimmlicht hatten eine Ausdehnung von etwa je 2 cm. Die Messungen ergaben, daß nur im Faradayschen Dunkelraum die halblogarithmischen Kurven linear anstiegen (Kurve 1). Hier lag also eine Maxwellverteilung der Elektronengeschwindigkeiten vor. Im negativen Glimmlicht und im Kathodendunkelraum war dagegen der ansteigende Teil der Kurven ein- oder sogar zweimal geknickt. Die Kurven im negativen Glimmlicht (Kurve 2) verliefen so, daß der Teil nach dem Knick steiler war, also eine kleinere Elektronentemperatur ergab, während im Kathodendunkelraum (Kurve 4) der Verlauf umgekehrt war, nach dem Knick verliefen die Kurven flacher, sie ergaben eine wesentlich höhere Temperatur. Das Übergangsgebiet zwischen Kathodendunkelraum und negativem Glimmlicht zeigte sich auch in dem Verlauf der Kurven,

die in diesem Gebiet zweimal geknickt waren (Kurve 3). Der Anstieg war zunächst linear, dann folgte ein flacheres Stück entsprechend dem Verlauf im Kathodendunkelraum, woran sich wieder ein steilerer Teil anschloß, entsprechend dem Anstieg im negativen Glimmlicht.

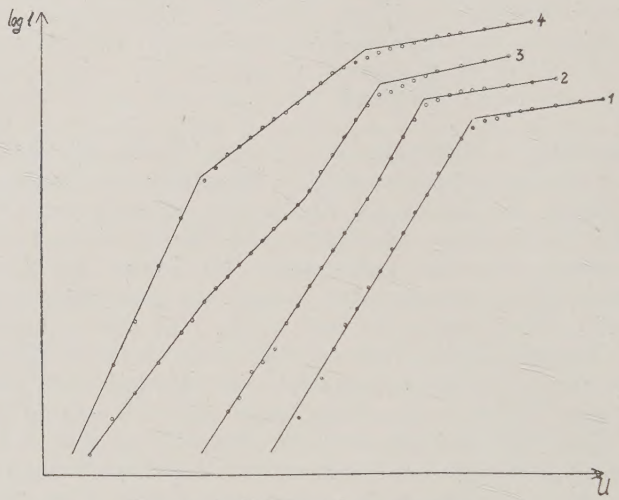


Fig. 2: halblogarithm. Kurven

Abscisse: Sondenspannung
Ordinate: log Sondenstrom

Derartige zweimal geknickte Kurven wurden bereits von Druyvesteyn (2) bei seiner Untersuchung des NV gefunden. Er bestimmte aus dem Verlauf der Kurven die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen und fand, daß die Anzahl der Elektronen in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich kleiner war, als einer Maxwellverteilung entsprechen würde. Er führte das darauf zurück, daß diese Elektronen bevorzugt zur Anregung von aus der Kathode zerstäubtem Ba und Sr verbraucht würden, da er auch im Spektrum des NV Linien des Ba und Sr fand. Wahrscheinlich ist jedoch dieser Verlauf der Kurven auf eine andere Ursache zurückzuführen. Es liegt vermutlich eine durch den Entladungsmechanismus bedingte Abweichung von der Maxwellverteilung vor, da in der vorliegenden Arbeit Kurven dieser Art in etwa 2 cm Abstand von der Kathode gefunden wurden, obwohl die Kathodentemperatur niedrig war und Linien des Ba und Sr in den zur Kontrolle gemachten Spektralaufnahmen nicht auftraten.

Da die im negativen Glimmlicht gefundenen Kurven durchaus denen entsprachen, die Denecke (6) bei Verwendung einer zu kurzen Sonde erhielt, obwohl eine Maxwellverteilung vorlag, wurde versucht, nach der von ihm angegebenen Methode im negativen Glimmlicht und im Kathodendunkelraum die Elektronentemperatur zu ermitteln. Es zeigte sich jedoch, daß in diesen beiden Entladungsteilen auch auf diesem Wege die Bestimmung einer Elektronentemperatur nicht möglich war. Die Verwendung längerer Sonden brachte gleichfalls sowohl bezüglich der Kurvenform als auch der Werte des Raumpotentials keine anderen Ergebnisse.

Dieser Befund läßt wohl den Schluß zu, daß die Abweichung der halblogarithmischen Kurven von der Geraden tatsächlich das Fehlen einer Maxwellverteilung im Kathodendunkelraum und im negativen Glimmlicht anzeigt, was ja auch zu erwarten ist, da im Kathodendunkelraum die Elektronen infolge des starken Feldes vorwiegend gerichtete Geschwindigkeit besitzen, während am Ende des Dunkelraums und im Glimmlicht die schnellen Elektronen dauernd zur Anregung und Ionisation verbraucht werden, sodaß sich erst am Ende des Glimmlichts eine Maxwellverteilung ausbilden kann.

Da die Elektronentemperatur bei der Bestimmung der Elektronenkonzentration mit eingeht, ist auch die Berechnung dieser Größe im Kathodendunkelraum und im negativen Glimmlicht nicht einwandfrei möglich. Die Werte, die man durch Einsetzen einer der beiden aus den Kurven formal zu entnehmenden Elektronentemperaturen erhält, dürften zu niedrig sein.

Das Raumpotential ließ sich aus dem Knick der halblogarithmischen Kurven auf etwa $\pm$ 0,1 V genau bestimmen. Im Kathodendunkelraum war infolge des flachen Verlaufs der Kurven vor dem Knick die Unsicherheit etwas größer. Im Falle einer Zylindersonde besteht die Möglichkeit, das Raumpotential genauer zu ermitteln, als es nach dieser Methode möglich ist, da in diesem Falle $i^2 \approx U$ sein sollte, solange U positiv ist. Es zeigte sich jedoch, daß die Kurven $i^2 = f(U)$ in fast allen Fällen keine Geraden waren, sodaß die Bestimmung des Raumpotentials auf die erste Möglichkeit beschränkt blieb.

Es wurden Entladungen durchgemessen, die etwa den in der Kennlinie eingezeichneten Arbeitspunkten entsprechen. I und II entsprechen dem Typ des anomalen NV, Brennspannung unter der ersten Anregungsspannung, III und IV dem des normalen NV mit einer Brennspannung zwischen Anregungs- und Ionisierungsspannung.

V ist ein normaler Bogen, der mit einer Spannung über der Ionisierungsspannung brennt. Die nach dem Umschlag des NV entstehende Entladungsform wurde nicht durch Sondenmessungen untersucht, da sie nur eine sehr kleine Stromstärke von einigen Milliampère aufwies, sodaß die Sondenströme infolgedessen außerordentlich klein geworden wären.

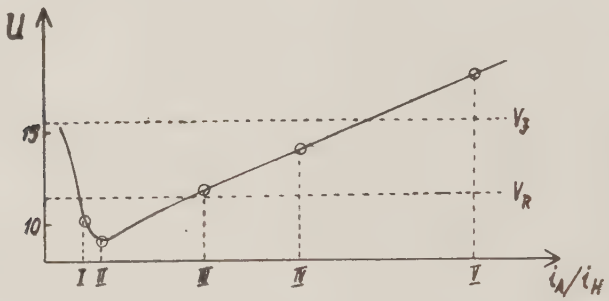


Fig. 3: Kennlinie des NV
(schematisch)

$V_R$ 1. Anregungsspannung $V_J$ Ionisierungsspannung

Es wurde aus den Kurven log i = f(U) das Raumpotential, die Elektronentemperatur und die Elektronenkonzentration ermittelt, die beiden letzten Größen aus den oben angeführten Gründen nur, soweit der Anstieg der halblogarithmischen Kurven linear war. Die Ergebnisse sind in der folgenden Fig. 4 zusammengefaßt. Zu den Kurven IV ist zu bemerken, daß die Meßpunkte in 5 mm Abstand von der Kathode nicht gewonnen werden konnten, da diese Entladung dicht vor der Kathode der Sonde auswich.

Allen Entladungen gemeinsam ist der Abfall der Elektronenkonzentration vom Ende des Glimmlichts zur Anode um eine Zehnerpotenz von etwa $10^{11}$ auf $10^{10}$. Dieser Abfall nimmt zu von I nach IV und sinkt wieder ab beim Übergang in den normalen Bogen bei V. Die Elektronentemperatur nimmt in den Entladungen I bis III ebenfalls vom Ende des negativen Glimmlichts zur Anode hin ab, jedoch zeigt dieser Abfall ein dem Verlauf des Konzentrationsgefälles entgegengesetztes Verhalten. Er ist bei I am größten und wird über II und III ständig kleiner, bei VI ist die Elektronentemperatur praktisch konstant über den ganzen untersuchten Bereich. Den Entladungen I bis IV, d. h. sowohl den normalen wie den anomalen NV gemeinsam

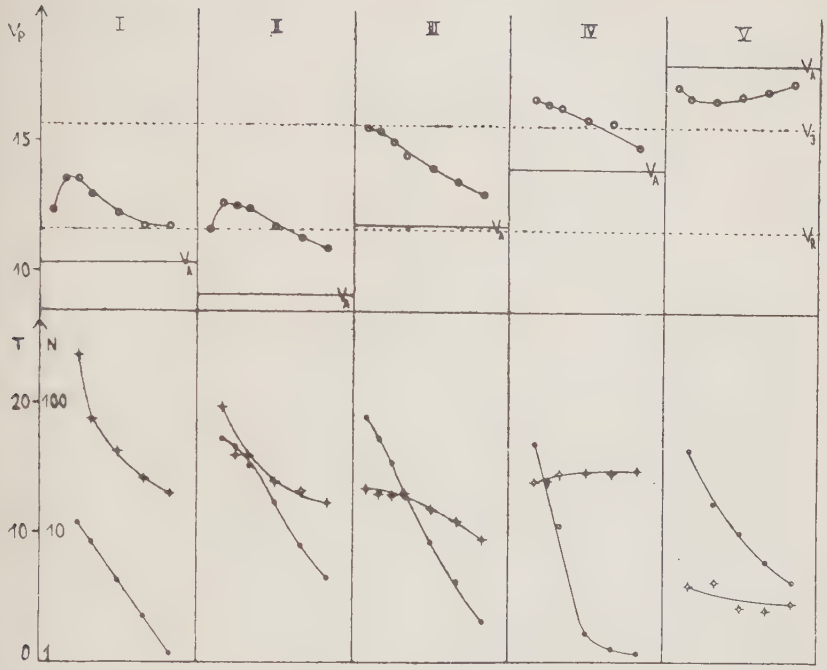


Fig. 4: Meßergebnisse

links jeweils Kathode, rechts Anode

$V_P$ : Raumpotential bezogen auf Kathode in Volt
$V_A$ : Anodenpotential
$V_R$ : erste Anregungsspannung
$V_J$ : Ionisierungsspannung
o——o N: Elektronenkonzentration in $10^{10}$ pro $cm^3$
T: Elektronentemperatur in $1000^0$ K

ist eine hohe Elektronentemperatur von im Mittel etwa $15\,000^0$ K. Beim Übergang in den normalen Bogen sinkt die Elektronentemperatur auf etwa $5\,000^0$ K. Die Kurven der Raumpotentiale zeigen in den Fällen I bis IV den für den NV typischen Verlauf, während V einer normalen Entladung mit Glühkathode entspricht (7). Die aus diesen Kurven zu entnehmenden Ergebnisse sind hier noch einmal zahlenmäßig zusammengefaßt. Dabei bedeuten $V_A$ Anodenspannung, $V_K$ Katho-

denfall, d die Fallraumdicke, gemessen von der Kathode bis zum Potentialmaximum, und E die Feldstärke im Fallraum.

| | $V_A$ Volt | $V_K$ Volt | d cm | E Volt/cm |
|---|---|---|---|---|
| I | 10,3 | 13,7 | 1,3 | 10,5 |
| II | 9,1 | 12,6 | 1,0 | 12,6 |
| III | 11,9 | 15,5 | 0,4 | 39 |
| IV | 14 | 16,8 | 0,1 | 168 |
| V | 18 | 17,2 | – | – |

Beim Fortschreiten nach weiter rechts gelegenen Arbeitspunkten auf der Kennlinie geht die Anodenspannung und mit ihr der Kathodenfall durch ein Minimum, um dann wieder anzusteigen. Bei III erreicht der Kathodenfall mit 15.5 V ungefähr den Wert der Ionisierungsspannung. Solange der Kathodenfall kleiner ist als die Ionisierungsspannung, gehen Kathodenfall und Anodenspannung ungefähr parallel, der Kathodenfall ist um etwa 3,5 V größer als die Anodenspannung. Wenn jedoch der Kathodenfall gleich der Ionisierungsspannung geworden ist, wächst er bei weiterer Verkleinerung der Emission nur noch langsam, die Erhöhung der Anodenspannung bewirkt hauptsächlich eine Verkleinerung des Gegenfeldes zwischen dem Potentialmaximum und der Anode, welches schließlich bei V, wenn die Anodenspannung die Ionisierungsspannung überschritten hat, in ein Beschleunigungsfeld umgewandelt ist.

In der Tabelle ist noch eingetragen die Tiefe des Kathodenfallraums. Es zeigt sich, daß der Fallraum mit kleiner werdender Emission bei festem Anodenstrom rasch abnimmt. Diese Abnahme ist so stark, daß die Feldstärke im Fallraum ständig wächst, obwohl der Kathodenfall zunächst ebenfalls abnimmt. Die Messungen ergaben zugleich, daß das Maximum des Raumpotentials stets an der Stelle lag, wo der Sondenstrom für eine positive Sondenspannung ein Minimum aufwies. Daher war es möglich, die Fallraumtiefe in Abhängigkeit von der Lage des Arbeitspunktes näher zu untersuchen, da durch eine einzige Messung die Lage des Maximums bestimmt werden konnte. In dieser Meßreihe wurde zur Erreichung anderer Arbeitspunkte bei festem Heizstrom der Anodenstrom variiert. Dieser Weg wurde aus mehreren Gründen eingeschlagen. Einmal ist bei Oxydkathoden die Emission nicht proportional dem Heizstrom, sodaß die Abhängigkeit der Fallraumtiefe vom Heizstrom nicht das richtige Bild der tatsächlichen Zusammenhänge gegeben hätte, andererseits wären, um eine hinreichende Anzahl von Meßpunkten zu erhalten, sehr

kleine Änderungen des Heizstroms erforderlich gewesen, die mit der benutzten Anordnung nicht mit ausreichender Genauigkeit reproduzierbar vorzunehmen waren. Der Zusammenhang zwischen Fallraumtiefe d, Anodenstrom i und Anodenspannung e bei festem Heizstrom ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

| i Amp. | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| e Volt | 10,6 | 10,4 | 10,2 | 10,4 | 10,5 | 10,5 | 10,6 | 10,7 | 10,9 | 11,2 | 11,5 | 12 |
| d cm | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,25 | 0,25 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,08 |

Für wachsenden Anodenstrom wird also die Fallraumtiefe anfangs rasch, dann langsam kleiner und nähert sich einem Endwert, der entweder bis zum Umschlag der Entladung erhalten bleibt oder beim Übergang in den normalen Bogen meist unstetig unterschritten wird. Dieser Zusammenhang konnte jedoch nicht bis zum Übergang des NV in den normalen Bogen bezw. bis zum Umschlag der Entladung durch Messungen verfolgt werden, da die Fallraumtiefe schon vor Erreichen dieses kritischen Punktes auf weniger als 1 mm absank und die in diesem Gebiet an sich schon nicht mehr sehr stabile Entladung durch die in so geringem Abstand von der Kathode stehende Sonde zu stark gestört wurde. Jedoch wurde die Fallraumtiefe, solange die Entladung als NV brannte, in keinem der beobachteten Fälle kleiner als etwa 0,05 cm.

Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß im NV, von der Erzeugung der Elektronen abgesehen, dieselben Verhältnisse vorliegen wie bei der Glimmentladung. Außerdem zeigten die mit verschiedenen Kathoden durchgeführten Sondenmessungen, daß die Beschaffenheit der Kathode keinen wesentlichen Einfluß auf den NV hat, solange der Bogenstrom unter dem Sättigungsstrom der Glühkathode bleibt. Erst beim Erreichen des Sättigungsstroms macht sie sich in entscheidender Weise bemerkbar.

### 5. Diskussion der Ergebnisse.

Auf Grund der Versuchsergebnisse scheint der Übergang des NV in eine andere Entladungsform beim Erreichen des Sättigungsstroms der Glühkathode etwa folgendermaßen vor sich zu gehen. Wird die

Kathodenemission konstant gehalten und der Bogenstrom vergrößert, so sinkt die Fallraumtiefe, daher wächst die Feldstärke im Fallraum. Dadurch wird einerseits der Emissionsstrom vergrößert, der raumladungsbegrenzt ist, solange der Bogenstrom kleiner ist als der Sättigungsstrom der Kathode, andererseits wird zunächst die Ausbeute an anregenden und ionisierenden Zusammenstößen erhöht. Für eine bestimmte Fallraumtiefe, die einem Bogenstrom unterhalb des Sättigungsstroms der Kathode entspricht, arbeitet dieser Mechanismus der Ionenbildung anscheinend mit optimaler Ausbeute, an dieser Stelle weisen Kathodenfall und Anodenspannung ein Minimum auf. Bei weiterer Verkleinerung des Fallraums wird die Ausbeute an ionisierenden Stößen wieder geringer, dieser Einfluß wird jedoch dadurch ausgeglichen, daß die Erhöhung der Feldstärke eine Vergrößerung der Anzahl der aus der Kathode austretenden Elektronen bewirkt, wodurch die Anzahl der insgesamt erfolgenden Zusammenstöße erhöht wird. Ist der Bogenstrom gleich dem Sättigungsstrom der Kathode geworden, dann sinkt bei weiterer Vergrößerung des Bogenstroms die Fallraumtiefe weiter, die Ausbeute an ionisierenden Stößen nimmt ebenfalls ab, die Erhöhung der Feldstärke bewirkt nun jedoch keine Vergrößerung des Elektronenstroms mehr, die diesen Einfluß ausgleichen könnte, infolgedessen werden die Verhältnisse in der Entladung instabil, der NV geht in eine andere Entladungsform über.

Ob der Übergang in den normalen Bogen erfolgt oder ob der Umschlag eintritt, hängt von der Beschaffenheit der Kathode ab. Wird eine Kathode großer Oberfläche mit gutem Temperaturausgleich verwandt, die durch geeignete, sorgfältige Herstellung und Vorbehandlung glatt und gleichmäßig ist, sodaß die Ausbildung hoher Feldstärken und großer Stromdichten an Rauhigkeiten der Oberfläche und bevorzugt emittierender Stellen infolge ungleichmäßiger Temperatur oder ungleichmäßigen Oxyds nicht möglich ist, dann tritt der Umschlag der Entladung ein. Wenn der Bogenstrom den Sättigungsstrom der Kathode erreicht, wird die für den NV charakteristische positive Raumladung abgebaut, infolgedessen verschwindet der Kathodenfall, es fließt nur noch der sehr schwache, raumladungsbegrenzte Elektronenstrom, wie ihn dieselbe Anordnung auch im Hochvacuum ergeben würde. Der im normalen Bogen wirksame Mechanismus der zusätzlichen Trägererzeugung kann sich an der glatten Kathode nicht ausbilden, es kann also in diesem Falle kein den Sättigungsstrom der Glühkathode übersteigender Bogenstrom zustande kommen.

Ist dagegen die Kathode rauh und ungleichmäßig in ihrer Emission, sodaß die Ausbildung von brennfleckartigen Ansatzstellen begünstigt wird, dann geht der NV beim Erreichen des Sättigungsstroms

in den normalen Bogen über. Die Entladung zieht sich auf die bevorzugt emittierenden Stellen zusammen, dadurch wird die Ausbildung des Ionisationsmechanismus ermöglicht, der im normalen Bogen die zusätzliche Erzeugung von Ladungsträgern bewirkt. Wie die Messungen zeigen, ist nun der Kathodenfall größer als die Ionisierungsspannung, die Fallraumtiefe beträgt größenordnungsmäßig nur noch etwa $10^{-3}$ cm, daher ist die Feldstärke sehr hoch, außerdem besteht eine große Stromdichte. Das sind die Bedingungen, die für eine zusätzliche Ionisation wesentlich sind, sodaß ein die Emission der Kathode übersteigender Bogenstrom zustande kommen kann. Es scheint also die Existenz des normalen Bogens an eine Kathode mit bestimmten Eigenschaften gebunden zu sein, die durch ihre Beschaffenheit erst die Ausbildung des für diese Entladungsform charakteristischen Ionisationsmechanismus ermöglicht. Diese Eigenschaften sind allerdings bei den üblicherweise verwandten Kathoden stets vorhanden, die einfachere Kathode ist nur unter besonderen Vorsichtsmaßregeln zu erhalten.

## 6. Zusammenfassung.

Es wurde untersucht, in welcher Weise die Beschaffenheit der Glühkathode die Form der Kennlinie des NV beeinflußt. Es zeigte sich, daß im allgemeinen beim Überschreiten des Sättigungsstroms der Glühkathode der NV in den normalen Bogen übergeht. Nur bei Verwendung von glatten, bezüglich Temperatur und Emission vollkommen gleichmäßigen Kathoden großer Oberfläche war ein den Sättigungsstrom übersteigender Bogenstrom nicht möglich. Zugleich wurde versucht, durch Sondenmessungen Einblick in den hier vorliegenden Entladungsmechanismus zu gewinnen, wobei sich ergab, daß in einem NV 3 verschiedene Typen von Sondencharakteristiken vorkommen. Der Unterschied tritt in der halblogarithmischen Darstellung deutlich hervor. Nur im Faradayschen Dunkelraum ist der Anstieg der Kurven linear, im negativen Glimmlicht ist er zur Spannungsachse konvex, im Kathodendunkelraum konkav. In dem Grenzgebiet dieser beiden Teile weist der Anstieg einen Wendepunkt auf, er ist bei stark negativen Werten des Sondenpotentials konkav und wird für weniger negative Werte konvex.

Die Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main ausgeführt, die experimentellen Untersuchungen wurden im Wintersemesters 1937/38 beendet. Herrn Professor Dr. K. W. Meissner statte ich hiermit meinen Dank ab für die Anregung der Arbeit, ebenso danke ich Herrn Professor Dr. M. Czerny für seine Hilfe bei der Zusammenfassung der Ergebnisse. Besonderen Dank schulde ich Herrn Dozenten Dr. H. Dänzer für seine ständige fördernde Anteilnahme.

## Literaturverzeichnis.


1. K. T. Compton u. C. Eckart:
   Phys. Rev. 25, 139 – 1925.
2. M. I. Druyvesteyn:
   Zs. f. Phys. 64, 781 – 1930.
3. M. I. Druyvesteyn:
   Physica III, 724 – 1936.
4. H. Kniepkamp:
   Phys. Zs. 37, 824 – 1936.
5. A. O. Zieger:
   Diss. Frankfurt-M. – 1935.
6. W. Denecke:
   Ann. d. Phys. 27, 597 – 1936.
7. Compton, Turner u. McCurdy:
   Phys. Rev. 24, 597 – 1924.

## Lebenslauf.

Am 7. Februar 1913 wurde ich als Sohn des Lokomotivführers Martin Völlkopf und seiner Ehefrau Lina geb. Hieß zu Frankfurt a. M. geboren. Ich besuchte 12 Jahre das Wöhler-Realgymnasium zu Frankfurt a. M., wo ich Ostern 1931 die Reifeprüfung ablegte. Anschließend widmete ich mich an der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt a. M. dem Studium der Naturwissenschaften. Meine Fächer waren Physik, theoretische Physik und Chemie. Die zur Vorlage dieser Dissertation notwendigen experimentellen Arbeiten kamen im Wintersemester 1937/38 zum Abschluß.

Georg Völlkopf.